

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Nikolina Sirovec

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Red. prof. dr. sc. Danko Ćorić

Student:

Nikolina Sirovec

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se red. prof. dr. sc. Danku Ćoriću na ukazanom povjerenju i prilici za pisanje završnog rada pod njegovim mentorstvom.

Jedno veliko hvala asistentu Matiji Sakomanu na danom strpljenju, svim korisnim savjetima i organizaciji eksperimentalnog dijela rada.

Također zahvaljujem asistentu Mihi Klaiću na pomoći prilikom izvedbe eksperimentalnog dijela.

Za kraj, zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na podršci i razumijevanju tijekom studija. Najviše zahvaljujem roditeljima bez kojih moje studiranje strojarstva nebi bilo moguće.

Nikolina Sirovec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:

proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

NIKOLINA SIROVEC

Mat. br.: 0035205550

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**ANALIZA KARAKTERISTIČNIH MEHANIZAMA TROŠENJA
REZNIH ALATA**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**CHARACTERISTIC CUTTING TOOL WEAR MECHANISMS
ANALYSIS**

Opis zadatka:

Tribološki najzahtjevnija primjena tvrdih metala su rezni alati. Ovi alati u svome radu, ovisno o načinu obrade odvajanjem čestica, uvjetima rada i materijalu koji se obrađuje pokazuje nekoliko karakterističnih pojava oblika trošenja. Detektirati i potpuno razlučiti mehanizme trošenja putem matematičkih algoritama gotovo je nemoguće, jer se istovremeno superponira više mehanizama čiji je međusobni omjer teško kvantificirati. Jedni valjani način detektiranja mehanizama trošenja jesu eksploatacijska ispitivanja čiji rezultati vrijede samo za jedan alat određenog oblika i određenu vrstu obrađivanog materijala.

U radu je potrebno slijedeće:

1. dati općeniti prikaz tvrdih metala i istaknuti njihova najvažnija svojstva
2. navesti područja primjene tvrdih metala
3. dati pregled karakterističnih procesa trošenja tvrdo-metalnih alata za obradu odvajanjem čestica
4. provesti prateća ispitivanja na raspoloživom alatu i detektirati karakteristične mehanizme trošenja
5. obraditi i analizirati rezultate mjerenja
6. donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:

29. studenog 2018.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Danko Čorić

Rok predaje rada:

1. rok: 22. veljače 2019.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.
3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.
3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. SVOJSTVA TVRDIH METALA	3
2.1. Tvrdća	3
2.2. Žilavost.....	5
2.3. Savojna čvrstoća	6
2.4. Tlačna čvrstoća	8
2.5. Modul elastičnosti, smični modul, Poissonov koeficijent.....	8
3. PRIMJENA TVRDIH METALA	10
4. MEHANIZMI TROŠENJA REZNIH ALATA.....	13
4.1. Abrazija.....	14
4.2. Adhezija	15
4.3. Difuzija.....	16
4.4. Oksidacija.....	17
5. TROŠENJE JEDNOREZNIM ALATOM.....	19
5.1. Obrada odvajanjem čestica	20
5.1.1. Tokarenje	23
5.2. Geometrija rezne oštrice	24
5.3. Oblici trošenja rezne oštrice alata	27
5.3.1. Trošenje prednje površine	27
5.3.2. Trošenje stražnje površine	28
5.3.3. Trošenje vrha alata	28
5.3.4. Trošenje stvaranjem naljepka	29
6. EKSPERIMENTALNI DIO	31
6.1. Snimanje trošenja stražnje površine.....	34
6.2. Snimanje trošenja prednje površine	37
7. ANALIZA REZULTATA MJERENJA I ZAKLJUČAK	40
LITERATURA.....	41
PRILOZI.....	42

POPIS SLIKA

Slika 1.	Mikrostruktura WC/Co tvrdog metala [1].....	1
Slika 2.	Ovisnost tvrdoće o % Co za različite veličine zrna [2]	4
Slika 3.	Ovisnost tvrdoće o temperaturi [5].....	4
Slika 4.	Ovisnost lomne žilavosti o % Co za pojedine skupine tvrdih metala [2].....	5
Slika 5.	Palmqvistova indentacijska metoda određivanja lomne žilavosti [5]	6
Slika 6.	Savojna čvrstoća kao funkcija udjela Co [5].....	7
Slika 7.	Relativna savojna čvrstoća na različitim temperaturama [5]	7
Slika 8.	Tlačna čvrstoća kao funkcija udjela Co za različite veličine WC zrna [5]	8
Slika 9.	Modul elastičnosti i Poissonov koeficijent kao funkcija udjela Co [5].....	9
Slika 10.	Primjena tvrdih metala I [2]:	10
Slika 11.	Primjena tvrdih metala II [1]:	11
Slika 12.	Mehanizmi trošenja reznih alata u ovisnosti o parametrima obrade [3]	13
Slika 13.	Jedinični događaj abrazije [7].....	14
Slika 14.	Abrazija ovisno o strukturi tribosustava [4]:	14
Slika 15.	Abrazija ovisno o djelovanju između abraziva i trošene površine [7]	15
Slika 16.	Jedinični događaj adhezije [7]	15
Slika 17.	Mehanizam difuzijskog trošenja na primjeru alata od volframovog karbida [6] ..	16
Slika 18.	Jedinični događaj oksidacije [7]	17
Slika 19.	Karakteristična područja trošenja na reznj oštici alata [4].....	17
Slika 20.	Karakteristični parametri trošenja rezne oštice [3]	19
Slika 21.	Shematski prikaz obrade odvajanjem čestica [8]	20
Slika 22.	Rezna oštica s glavnim komponentama	21
Slika 23.	Podjela postupaka obrade odvajanjem čestica [8].....	22
Slika 24.	Podjela strojnih postupaka obrade odvajanjem čestica [8]	22
Slika 25.	Gibanja kod obrade odvajanjem čestica [8]	23
Slika 26.	Gibanja kod tokarenja i parametri obrade [8]	23
Slika 27.	Posmak kod tokarenja [8].....	24
Slika 28.	Geometrija rezne pločice	24
Slika 29.	Oblici reznih pločica [10].....	25
Slika 30.	Skošenja reznih pločica [10]	25
Slika 31.	Tipovi umetanja reznih pločica [10]	26
Slika 32.	Pojava kratera na prednjoj površini rezne pločice [3]	27
Slika 33.	Trošenje stražnje površine alata [3].....	28
Slika 34.	Trošenje vrha rezne oštice [3]	29
Slika 35.	Naljepak na oštici alata [3].....	30
Slika 36.	Rezna pločica SNUN 120408.....	31
Slika 37.	Rezna pločica stegnuta u držač	31
Slika 38.	Tokarski obradni centar SBL 500	32
Slika 39.	Obradak stegnut u stroj.....	33
Slika 40.	Detalj zahvata	33
Slika 41.	Snimanje rezne oštice.....	34
Slika 42.	Projicirana slika trošenja	35
Slika 43.	Trošenje stražnje površine rezne pločice:	36

Slika 44.	Grafička ovisnost parametra VB o vremenu	37
Slika 45.	Trošenje prednje površine rezne pločice:	38
Slika 46.	Grafička ovisnost dubine kratera o vremenu.....	39

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Podjela tvrdih metala u ovisnosti o veličini karbidne faze [1]	3
Tablica 2.	Područja primjene različitih vrsta tvrdih metala [2].....	11
Tablica 3.	Dimenzije SNUN pločice	24
Tablica 4.	Tolerancijska polja reznih pločica [10]	26
Tablica 5.	Parametri obrade.....	32

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a_p	mm	dubina rezanja
f	mm	posmak
F	N	sila
F_N	N	normalna sila
F_t	N	tangencijalna sila
HV	HV	vickersova tvrdoća
l	mm	duljina rezne pločice
K_{IC}	MPa·m ^{1/2}	lomna žilavost
KB	mm	širina kratera
KM	mm	udaljenost središta kratera od oštrice
KT	mm	dubina kratera
m	mm	udaljenost između vrha pločice i upisane kružnice u pločicu
r_ϵ	mm	polumjer vršnog dijela rezne pločice
R_{ms}	MPa	savojna čvrstoća
R_{mt}	MPa	tlačna čvrstoća
s	mm	širina rezne pločice
VB	mm	širina trošenja na stražnjoj površini
v_c	m/min	brzina rezanja
d	mm	promjer upisane kružnice

SAŽETAK

Tema ovog rada su tvrdi metali uključivo njihov kemijski sastav, mikrostruktura, svojstva, mehanizmi trošenja i područje primjene. Najzahtjevnija primjena tvrdih metala je za alate koji se koriste za obradu odvajanjem čestica. Ovisno o materijalu, uvjetima rada i načinu rada na reznoj oštrici javljaju se određeni oblici trošenja. Matematičkim putem trošenje je gotovo nemoguće detektirati i kvantificirati. Stoga se danas velika pažnja posvećuje eksploatacijskim ispitivanjima te je u eksperimentalnom dijelu rada provedeno ispitivanje trošenja jednoreznim alatom u približno realnim radnim uvjetima kako bi se razmotrilo koji se oblici trošenja najčešće javljaju kod reznih alata. Radi se obradi tokarenjem pri čemu je rezna pločica od tvrdog metala, a kao obradak koristi se trupac od sivog lijeva. Nakon obrade, kamerom se snimaju određene površine rezne oštrice te se pomoću odgovarajućeg računalnog programa mjere oštećenja na prednjoj i stražnjoj površini reznog alata. Razmatranjem rezultata mjerenja dolazi se do zaključka koji su mehanizmi trošenja dominantni na tvrdo-metalnoj reznoj pločici.

Ključne riječi: tvrdi metali, svojstva, rezni alat, mehanizmi trošenja.

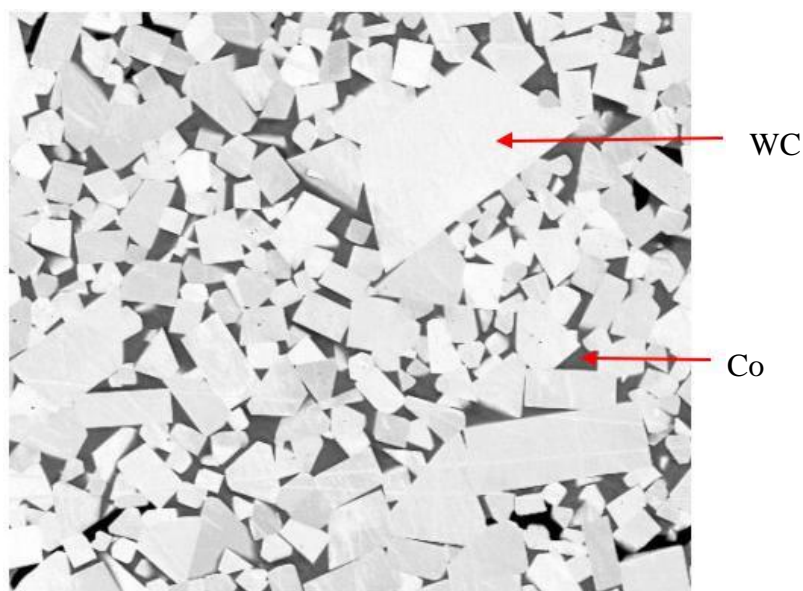
SUMMARY

The topic of this paper are hard metals including their chemical composition, microstructure, properties, wear mechanisms and application area. The most demanding application of hard metals is for tools used for particle separation processing. Depending on the material, operating conditions and operation of the cutting blade there are certain forms of wear. Mathematical wear is almost impossible to detect and quantify. Therefore, great attention is paid today to the exploitation tests and in the experimental part of the work, a one-tool wear test was carried out in roughly realistic working conditions to consider which forms of wear most often occur in cutting tools. It is machined by turning, whereby the cuttable is made of hard metal, and as a grain is used a gray cast iron. After processing, the camera captures certain areas of the cutting blade and uses the appropriate computer program to measure the damage to the front and back surface of the cutting tool. Considering the measurement results, it comes to the conclusion that the wear mechanisms are dominant on the hard-metal cutting plate.

Key words: hard metals, properties, cutting tools, wear mechanisms.

1. UVOD

Tvrđi metali (eng. hard metals), sustav WC-Co, su najpoznatiji i najuspješniji predstavnici materijala dobivenih metalurgijom praha. To su metalni kompoziti koji se sastoje od visokog udjela karbida volframa (WC) i u nešto manjoj mjeri titana (TiC) i tantala (TaC) koji su najčešće međusobno povezani kobaltom (Co) kao vezivom [1]. Naziv ovih materijala ukazuje na njihovo najvažnije svojstvo – tvrdoću. Upravo su karbidi nositelji te tvrdoće i otpornosti na trošenje dok kobalt, vezivni materijal, osigurava mekšu i žilaviju matricu. Na slici 1 prikazana je mikrostruktura WC/Co tvrdog metala.



Slika 1. Mikrostruktura WC/Co tvrdog metala [1]

Svojstva tvrdih metala su: visoka tvrdoća i otpornost na trošenje, visoka tlačna čvrstoća, visoki modul elastičnosti, visoka temperatura taljenja, dobra toplinska i električna vodljivost, otpornost na koroziju, dobra postojanost pri promjenama temperature, visoka čvrstoća pri povišenim temperaturama [1].

Tvrđi metali se dijele prema normi ISO 513 u 6 skupina s obzirom na obrađivani materijal:

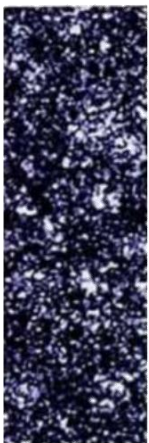
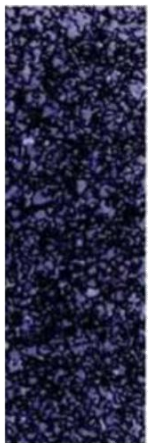

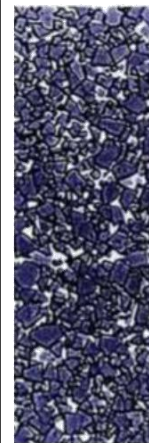



- **tvrdi metali skupine K** - prikladni za obradu materijala s kratkom strugotinom poput ljevova na bazi željeza, porculana, kamena, drva i polimernih materijala,
- **tvrdi metali skupine P** - prikladni za obradu materijala s dugom strugotinom,
- **tvrdi metali skupine M** - prikladni za obradu korozijski postojanih čelika,
- **tvrdi metali skupine N** - prikladni za obradu Al i Mg legura, keramike,
- **tvrdi metali skupine S** - prikladni za obradu superlegura, titana i njegovih legura,
- **tvrdi metali skupine H** - prikladni za obradu tvrdih metala [5].

2. SVOJSTVA TVRDIH METALA

Mehanička svojstva tvrdih metala ovise o mikrostrukturnim karakteristikama različitih karbida i sadržaju kobalta. Porastom udjela Co, kao mekanije i žilavije faze, smanjuju se vrijednosti tvrdoće i tlačne čvrstoće, ali rastu vrijednosti žilavosti.

Na svojstva tvrdog metala također utječe veličina zrna karbidne faze. Sukladno normi EN ISO 4499-2:2008 podijeljeni su u skupine kako je prikazano u tablici 1[1]. Svaku vrstu karakteriziraju različita mehanička svojstva te prema tome svaka vrsta ima drugačiju primjenu.

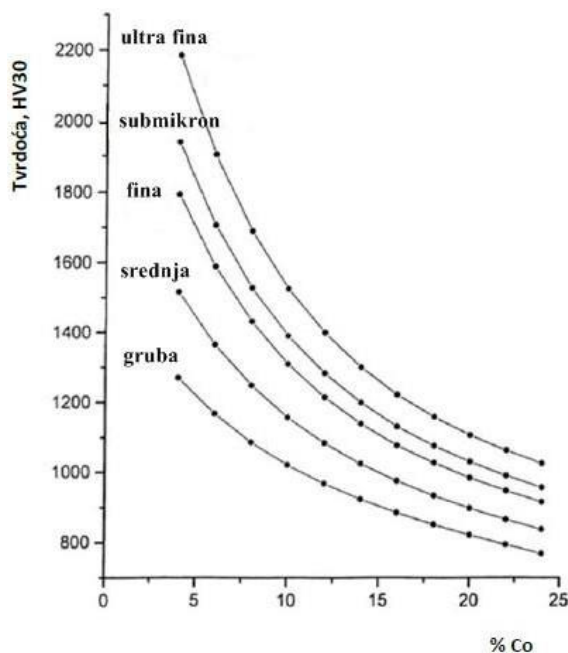
Tablica 1. Podjela tvrdih metala u ovisnosti o veličini karbidne faze [1]

Vrsta, veličina zrna karbidne faze, μm						
Nano	Ultra fina	Submikron	Fina	Srednja	Gruba	Ekstra gruba
< 0,2	0,2 - 0,5	0,5 - 0,8	0,8 - 1,3	1,3 - 2,5	2,5 - 6,0	> 6,0
						

2.1. Tvrdoća

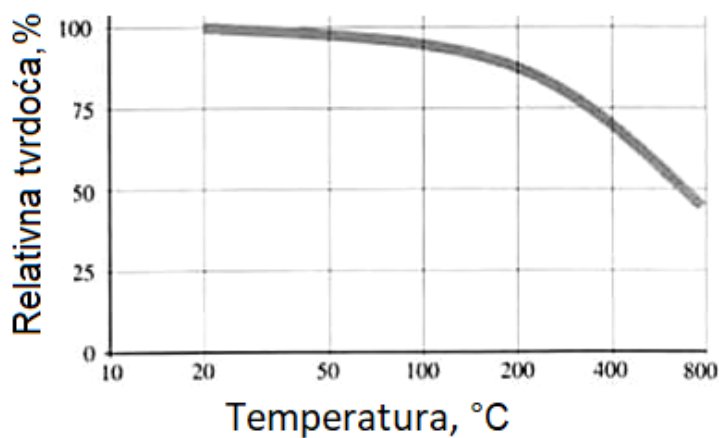
Izuzetno visoke vrijednosti tvrdoće su jedna od glavnih karakteristika tvrdih metala. Raspon tvrdoća seže od 700 HV30 pa sve do 2200 HV30 [5]. Vrijednosti tvrdoće ovise o udjelu

kobalta i o veličini WC zrna. Kako je Co znatno mekši i žilaviji, proizlazi da se tvrdoća tvrdih metala smanjuje porastom sadržaja Co. Također, što je veća veličina WC zrna, tvrdi metali posjeduju manju tvrdoću. Tvrdoća tvrdih metala u ovisnosti o udjelu Co i veličini WC zrna prikazana je na slici 2.



Slika 2. Ovisnost tvrdoće o % Co za različite veličine zrna [2]

Još jedan od parametara o kojem varira tvrdoća jest temperatura. Tvrdoća se smanjuje s porastom temperature kako je prikazano na slici 3.

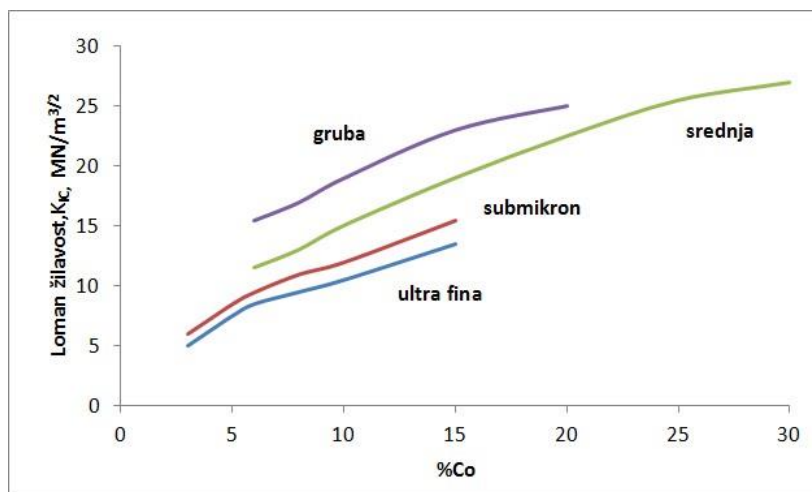


Slika 3. Ovisnost tvrdoće o temperaturi [5]

Proces mjerenja tvrdoće je relativno jednostavno ispitivanje. Najčešće se određuje po Vickersovoj metodi. Preporučena vrijednost primijenjenog opterećenja iznosi 294 N (HV30) iako se može primijeniti bilo koja vrijednost. Kod ultra finih i nano tvrdih metala koji posjeduju vrijednosti tvrdoće iznad 2000 HV30, postavljaju se dodatni zahtjevi za mjerenje tvrdoće zbog izuzetno male veličine dijagonale otiska. Priprema površine može biti izvor nesigurnosti kod mjerenja tvrdoće ultra finih i nano tvrdih metala. Razlog tome su zaostala naprezanja nastala tijekom brušenja [1].

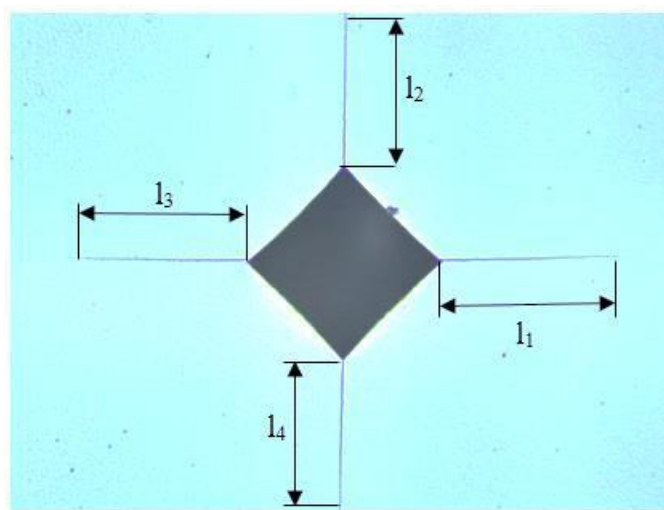
2.2 Žilavost

Tvrde metale odlikuje kombinacija visoke tvrdoće i relativno dobre žilavosti. Zbog toga imaju široko područje primjene i najčešće su upotrebljavani materijal za izradu reznih alata. Njihova žilavost potječe od mekše i žilave matrice, a ovisi o kemijskom sastavu i mikrostrukтури te je obrnuto proporcionalna tvrdoći. Raste s padom tvrdoće, povećanjem udjela Co u sastavu i pogrubljenjem karbidnog zrna. Na slici 4 prikazana je ovisnost lomne žilavosti tvrdih metala o udjelu Co i veličini karbidnog zrna [1].



Slika 4. Ovisnost lomne žilavosti o % Co za pojedine skupine tvrdih metala [2]

Lomna žilavost, K_{IC} , definirana je kao mjera otpornosti materijala širenju pukotine i koristi se za procjenu dugotrajnosti tvrdih metala. Kod tvrdometalnih proizvoda prilikom grubljih režima obrade odvajanjem čestica razvijaju se pukotine koje dovode do loma. Kod krhkih materijala, vrijednosti lomne žilavosti teže je procijeniti. Za utvrđivanje lomne žilavosti tvrdih metala standardizirana je 2009. godine metoda po Palmqvistu. Kod ove metode mjere se duljine pukotina koje se šire iz vrhova otiska indentacije kao što je prikazano na slici 5 [5].

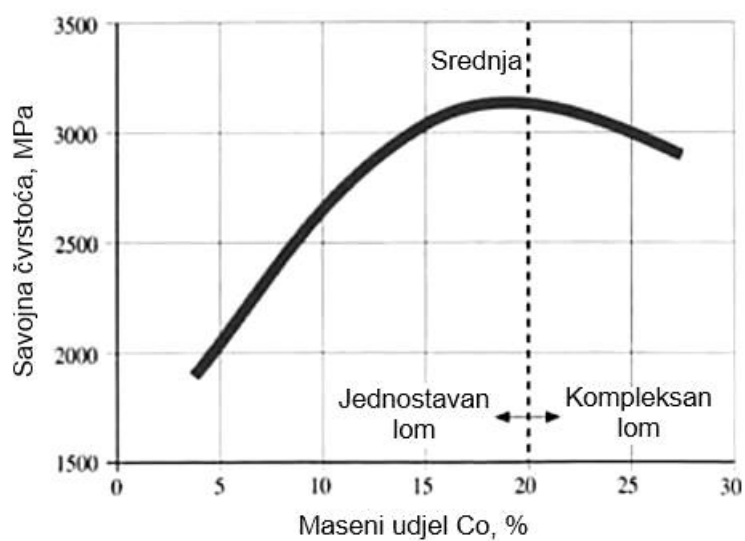


Slika 5. Palmqvistova indentacijska metoda određivanja lomne žilavosti [5]

Duljina pukotina obrnuto je proporcionalna lomnoj žilavosti materijala. Što se tiče povišene temperature, istraživanja su pokazala da je lomna žilavost tvrdih metala stabilna sve do 600°C.

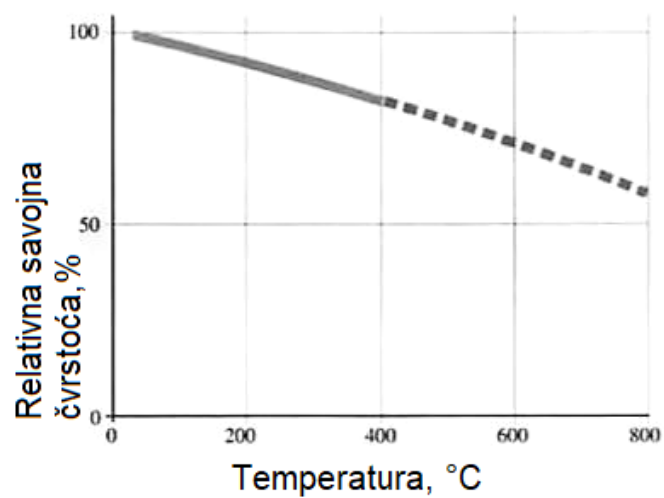
2.3. Savojna čvrstoća

Najveći iznosi savojne čvrstoće (R_{ms}) zabilježeni su kod tvrdih metala s 15 do 20 % Co i srednjom do grubom veličinom WC zrna kao što prikazuje dijagram na slici 6 [5].



Slika 6. Savojna čvrstoća kao funkcija udjela Co [5]

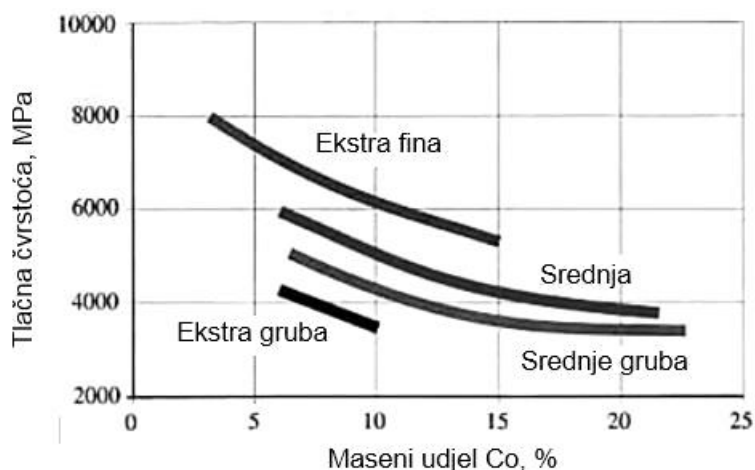
Također je utvrđeno da se porastom temperature savojna čvrstoća tvrdih metala smanjuje, slika 7.



Slika 7. Relativna savojna čvrstoća na različitim temperaturama [5]

2.4. Tlačna čvrstoća

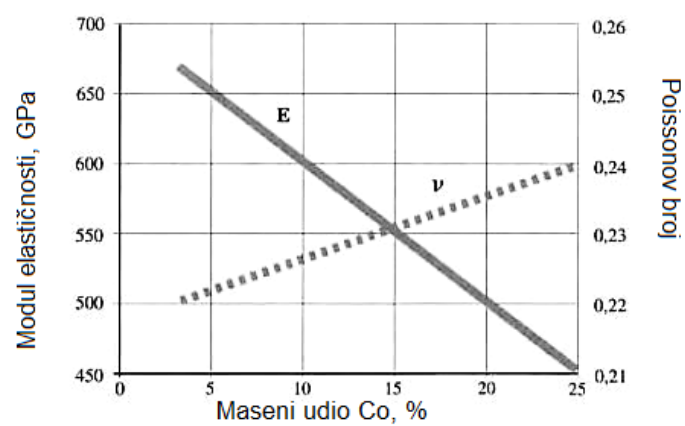
Uz visoku tvrdoću, tvrde metale karakterizira visoka tlačna čvrstoća (R_{mt}) koja raste smanjenjem udjela Co i usitnjenjem zrna karbida. Vrijednosti tlačne čvrstoće za tvrde metale različitih veličina zrna ovisno o masenom udjelu Co prikazane su na slici 8. Raspon tlačne čvrstoće tvrdih metala iznosi od 3000 MPa do 9000 MPa [5].



Slika 8. Tlačna čvrstoća kao funkcija udjela Co za različite veličine WC zrna [5]

2.5. Modul elastičnosti, smični modul, Poissonov koeficijent

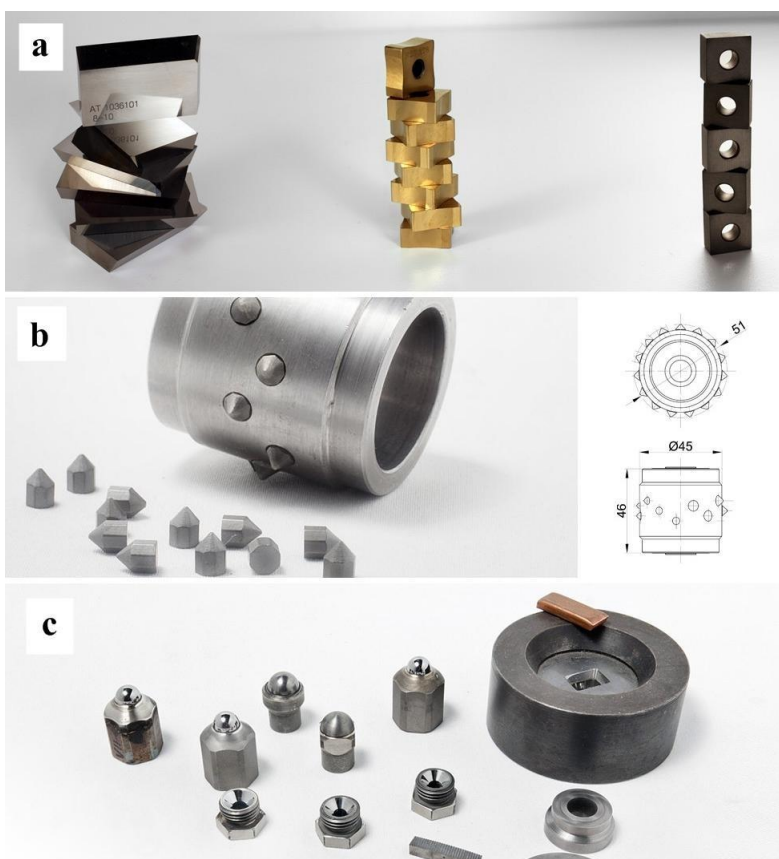
Tvrđi metali su kruti materijali. Youngov modul i Poissonov koeficijent za tvrde metale mijenjaju se u ovisnosti o sadržaju kobalta. Iz dijagrama na slici 9 vidljivo je da modul elastičnosti raste linearno sa smanjenjem udjela Co, dok Poissonov koeficijent opada. U usporedbi s čelikom, modul elastičnosti tvrdih metala je dva do tri puta viši, a Poissonov koeficijent je niži zbog većeg modula smičnosti [5].



Slika 9. Modul elastičnosti i Poissonov koeficijent kao funkcija udjela Co [5]

3. PRIMJENA TVRDIH METALA

Područje primjene tvrdih metala svakodnevno raste zahvaljujući izvrsnim svojstvima: visoka tvrdoća i otpornost na trošenje, visoka tlačna čvrstoća, postojanost na povišenim temperaturama, otpornost na korozivne medije, visoki modul elastičnosti. Ova kombinacija svojstva omogućuje upotrebu tvrdih metala najčešće za proizvodnju alata za obradu metala te za konstrukcijske dijelove otporne na trošenje. U interesu je razvoj ultra i nano prahova sve manje veličine zrna koji se koriste za proizvodnju mikroalata, posebice mikrosvrđala, za matične ploče u mini elektroničkoj opremi. Razne primjene tvrdih metala prikazane su na slikama 10 i 11.



Slika 10. Primjena tvrdih metala I [2]:

- (a) rezne pločice za obradu metala,**
- (b) alat za obradu kamena,**
- (c) konstrukcijski elementi otporni na trošenje**



Slika 11. Primjena tvrdih metala II [1]:

a) mikroalati za matične ploče

b) alati za bušenje nafte i plina

Istraživanja pokazuju da gotovo 67% svjetske proizvodnje tvrdih metala otpada na proizvodnju alata za obradu metala, 13% na alate za rudarstvo i bušenje nafte, 11% na alate za obradu drva i 9% na građevinarstvo [2].

Tablica 2. Područja primjene različitih vrsta tvrdih metala [2]

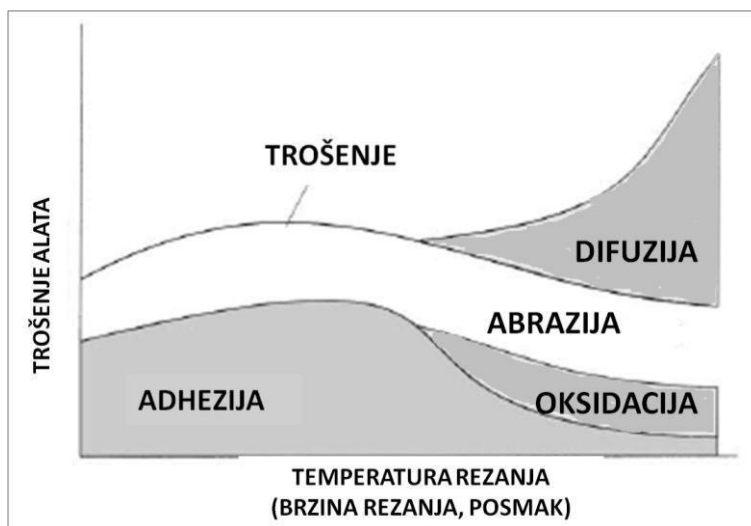
Vrsta	Mikrostrukturne faze	Sadržaj Co, %	Područje primjene
nano	WC, Co	3 - 9	mikroalati za mini elektroničku opremu
ultra fina	WC, Co	2 – 4 6 - 9	obrada drva, dijelovi otporni na trošenje mikrobušilice i mikroalati za matične ploče, reznici alati za obradu metala
submikron	WC, Co WC, Co WC-Ni(Cr)(Co)	10 – 16 4 – 16 4 – 20	reznici alati, noževi za papir reznici alati za metal, alati za vratila kemijsko inženjerstvo, dijelovi za korozivne atmosfera, nemagnetični dijelovi
fina	WC-(Ti,Ta,Nb)C-Co WC, Co WC-Ni(Cr)(Co)	4 – 15 4 – 25 4 – 20	reznici alati za obradu čelika reznici alati za metal, dijelovi otporni na trošenje kemijsko inženjerstvo, dijelovi za korozivne atmosfera, nemagnetični dijelovi
srednja	WC-(Ti,Ta,Nb)C-Co WC, Co WC-Ni(Cr)(Co)	4 – 15 4 – 25 4 – 20	reznici alati za obradu čelika teški uvjeti obrade, obrada metala kemijsko inženjerstvo, dijelovi za korozivne atmosfera, nemagnetični dijelovi
gruba	WC, Co	4 – 25	alati za rudarstvo, alati za bušenje nafte i plina
ekstra gruba	WC, Co	4 – 25	obrada metala, alati za rudarstvo, alati za bušenje nafte i plina

Razvoj ultrafinih i nano prahova omogućuje homogenu mikrostrukturu veličine zrna polaznih prahova što rezultira poboljšanim mehaničkim svojstvima. Ostvaruje se duži vijek trajanja alata, manje tolerancije i veće brzine rezanja. Glavni problem primjene nanoprahova je zadržavanje male veličine zrna jer su prahovi izuzetno reaktivni, a zrna sklona rastu tijekom postupka sinteriranja u tekućoj fazi. Da bi se to spriječilo, dodaju se inhibitori rasta zrna koji zadržavaju sitnozrnatu strukturu.

4. MEHANIZMI TROŠENJA REZNIH ALATA

Alati za obradu odvajanjem čestica izloženi su velikim silama i udarcima te toplinskim i mehaničkim naprezanjima. U cilju što brže i točnije obrade važno je da alat ostane čim duže u zahvatu s materijalom. Trošenje alata tijekom obrade bitno je na vrijeme prepoznati kako bi se izbjegle nepravilnosti tijekom obrade, a samim time troškovi proizvodnje zbog zamjene alata i smanjivanja brzine obrade. Potreban je konstantan nadzor trošenja alata kako bi se spriječila oštećenja ili puknuća alata.

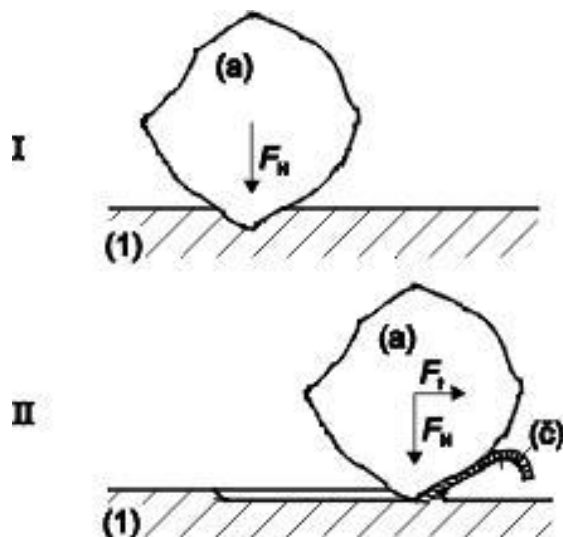
Trošenje je definirano kao postupni gubitak materijala alata i promjenom oblika alata tijekom procesa obrade odvajanjem čestica. Mehanička, toplinska i kemijska naprezanja uzrokuju različite mehanizme trošenja odnosno razvijanje triboloških procesa na reznoj oštrici alata. Mehanizmi trošenja reznih alata su abrazija, adhezija, difuzija i oksidacija. Na slici 12 prikazana je ovisnost karakterističnih mehanizama trošenja reznih alata u ovisnosti o parametrima obrade. Pri nižim temperaturama prevladavaju abrazija i adhezija dok s porastom temperature raste utjecaj difuzije i oksidacije.



Slika 12. Mehanizmi trošenja reznih alata u ovisnosti o parametrima obrade [3]

4.1. Abrazija

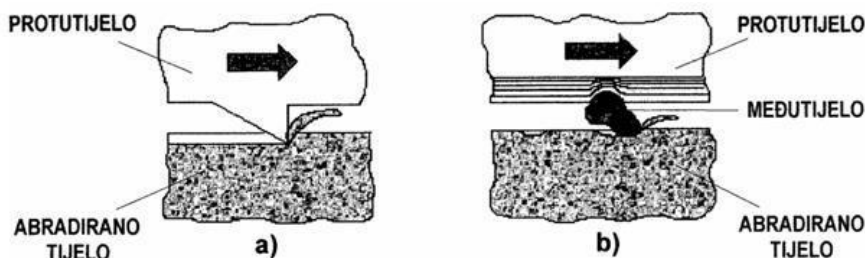
Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama. Posljedica je prodiranja tvrdog materijala uz brazdanje pri uzajamnom gibanju tijela [4]. Jedinični događaj abrazije prikazan je na slici 13.



Slika 13. Jedinični događaj abrazije [7]

U prvoj fazi abraziv prodire u površinu materijala pod utjecajem normalne komponente opterećenja F_N . U drugoj fazi dolazi do istiskivanja materijala u obliku čestica trošenja pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja F_T .

Ovisno o strukturi tribosustava, abrazija se može podijeliti u dvije skupine, slika 14. To su abrazija u dodiru dva tijela i abrazija u dodiru tri tijela.



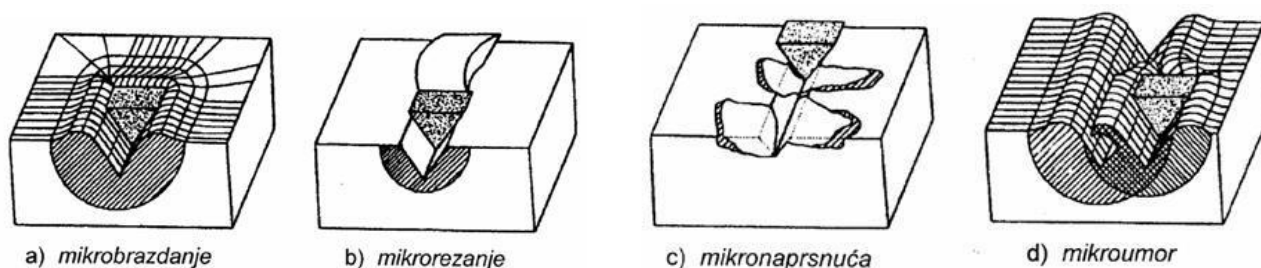
Slika 14. Abrazija ovisno o strukturi tribosustava [4]:

a) abrazija u dodiru dva tijela

b) abrazija u dodiru tri tijela

Ovisno o međusobnom djelovanju između abrazivskih čestica i trošene površine (slika 15) abrazija se dijeli na [7]:

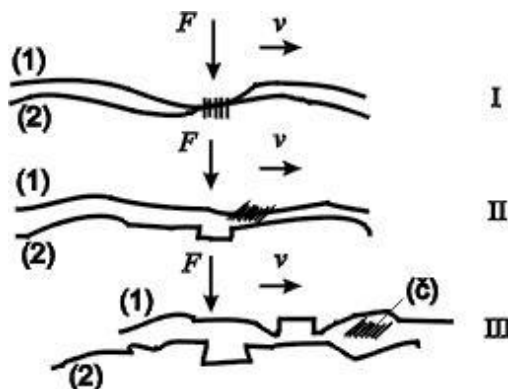
- mikrobrazdanje,
- mikrorezanje,
- mikronaprsnuća,
- mikroumor.



Slika 15. Abrazija ovisno o djelovanju između abraziva i trošene površine [7]

4.2. Adhezija

Adhezija je proces kojeg opisuje prijelaz materijala s jedne klizne plohe na drugu pri relativnom gibanju, a zbog procesa zavarivanja krutih faza [4]. Adhezija je rezultat djelovanja međuatomskih/međumolekulskih sila u točkama dodira tijela i formiranja mikrozavara koji se raskidaju pri uzajamnom gibanju tijela. Sastoji se od više faza, a jedinični proces adhezije prikazan je na slici 16.



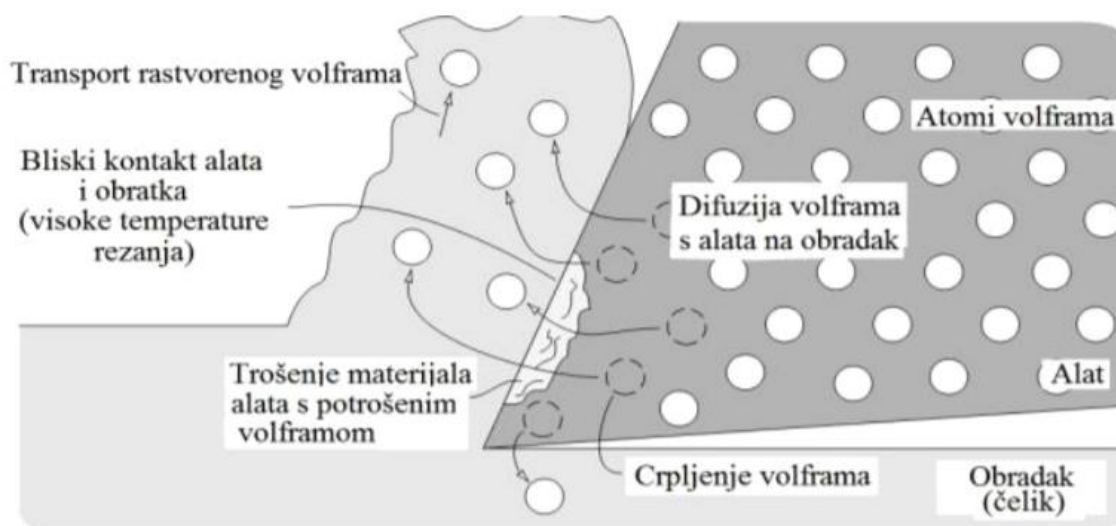
Slika 16. Jedinični događaj adhezije [7]

U prvoj fazi dolazi do nastajanja adhezijskog spoja različitog stupnja jakosti na mjestu dodira izbočina. U drugoj fazi slijedi raskidanje adhezijskog spoja, a čestica trošenja ostaje nalijepljena na jednom članu kliznog para. U trećoj fazi ova se čestica otkida.

Osnovni kriterij za mjeru otpornosti na adhezijsko trošenje materijala je njihova tribološka kompatibilnost. Definira se kao prikladnost za rad u kliznom paru i bolja je za materijale koji nisu skloni mikrozavarivanju u međusobnom dodiru.

4.3. Difuzija

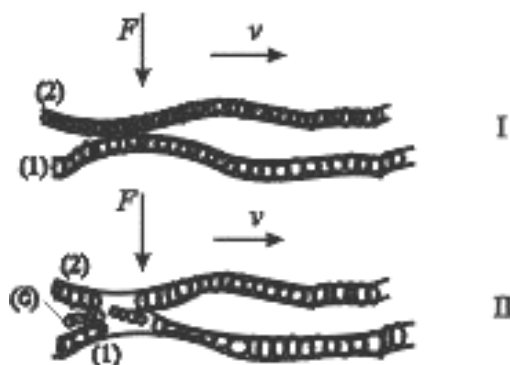
Difuzija je termo-kemijski mehanizam trošenja gdje uslijed visokih kontaktnih naprezanja i visokih temperatura dolazi do premještanja atoma iz područja više koncentracije u područje niže koncentracije [6]. Brzina difuzije raste s porastom temperature. Difuzija atoma s površine alata uzrokuje krhki sloj sa smanjenim iznosom čvrstoće. Uvjet nastanka difuzijskog trošenja je metalurško spajanje dviju površina uslijed čega se atomi mogu slobodno gibati unutar sučelja. Temperatura procesa mora biti dovoljno visoka da bi se difuzija odvijala brzo i mora postojati sklonost otapanja materijala alata u materijalu obratka. Difuzijsko trošenje prikazano je na slici 17 na primjeru alata od volframovog karbida.



Slika 17. Mehanizam difuzijskog trošenja na primjeru alata od volframovog karbida [6]

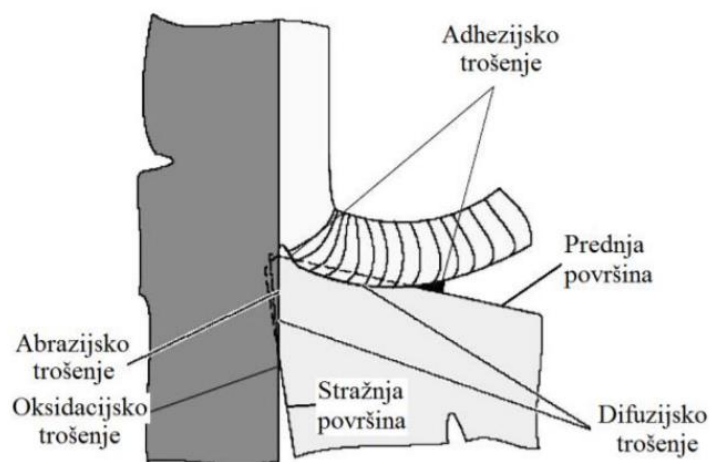
4.4. Oksidacija

Oksidacija je elektrokemijski proces trošenja. Pod utjecajem visokih temperatura i kisika formira se krhki oksidacijski sloj koji lako puca. Njegovo periodičko formiranje i uništavanje uzrokuje trošenje materijala. Jedinični događaj oksidacijskog trošenja prikazan je na slici 18. U prvoj fazi dolazi do stvaranja (ili obnavljanja) sloja produkata korozije. U drugoj fazi mjestimično se razara sloj produkata oksidacije.



Slika 18. Jedinični događaj oksidacije [7]

Abrazija i adhezija su mehanizmi trošenja kao posljedica mehaničkog opterećenja. Oksidacija i difuzija posljedica su kemijskog djelovanja između alata, obratka i okoline. Slika 19 prikazuje djelovanje navedenih mehanizama trošenja na reznoj oštrici alata.



Slika 19. Karakteristična područja trošenja na reznoj oštrici alata [4]

Adhezijsko trošenje je najizraženije na prednjoj površini alata jer se na tom mjestu zbog vrlo visokih sila trenja javljaju visoke temperature te dolazi do mikrozavarivanja i skidanja čestica materijala s alata. Na stražnjoj površini se ne javljaju iznimno visoke temperature, tako da je dominantan mehanizam trošenja abrazija zbog klizanja alata po obrađenoj površini. Na dijelu koji je u kontaktu s okolišem uslijed povišene temperature dolazi do oksidacijskog trošenja. Proizlazi da su abrazija i adhezija prisutne uvijek kod procesa obrade i prevladavaju kod nižih temperatura dok su difuzija i oksidacija karakteristične za povišene temperature.

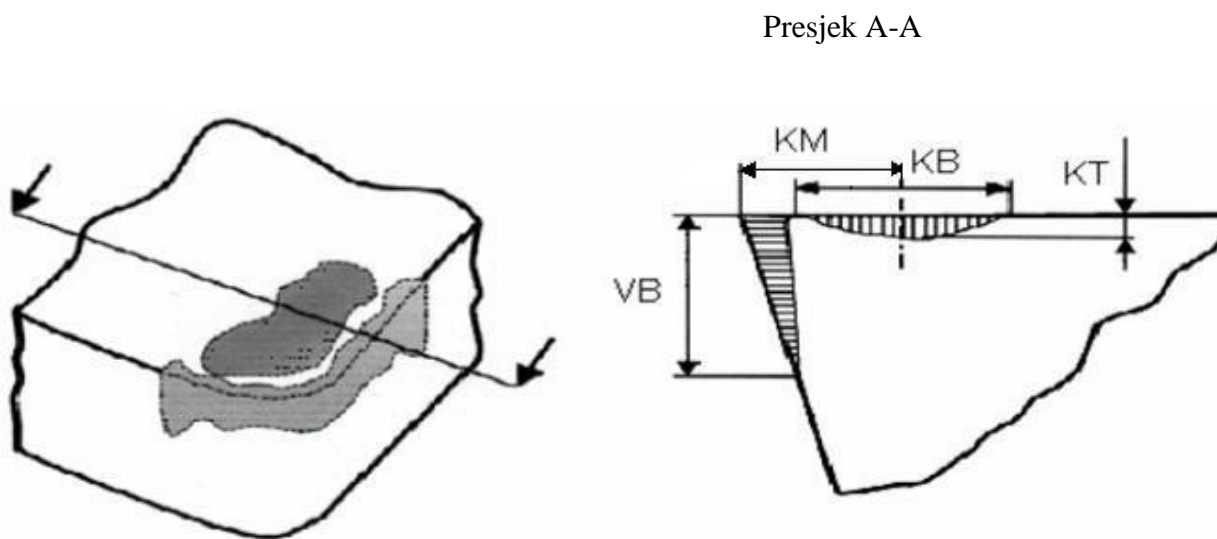
5. TROŠENJE JEDNOREZNIM ALATOM

Trošenje alata je nepoželjan proces pri čemu se smanjuju njegova rezna svojstva. Kraj radnog vijeka alata određuje se promatranjem određenih pojava. To su promjene zvuka stroja pri obradi, promijenjeni izgled površine obratka i promjene oblika same rezne oštrice ili se dotrajalost može utvrditi mjerenjem određenih veličina koje se nazivaju parametri trošenja (slika 20) [3].

To su jednodimenzijske veličine kao što slijedi:

- VB - širina trošenja na stražnjoj površini
- KT - dubina kratera
- KM - udaljenost središta kratera od oštrice
- KB - širina kratera.

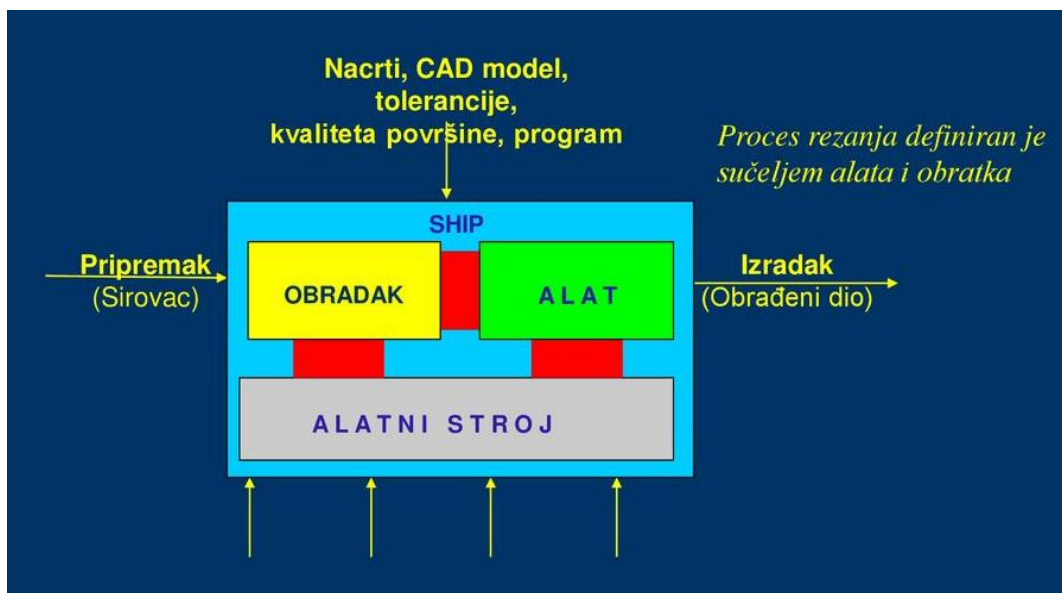
Sposobnost obrade alata se najviše smanjuje zbog trošenja stražnje površine pa se širina pojasa trošenja na stražnjoj površini često koristi kao kriterij trošenja.



Slika 20. Karakteristični parametri trošenja rezne oštrice [3]

5.1. Obrada odvajanjem čestica

Ispitivanje trošenja jednoreznim alatom (eng. *Single Point Turning Test - SPTT*) je zapravo postupak obrade odvajanjem čestica pretežno rotacijskih obradaka. Obrada odvajanjem čestica definirana je kao postupak promjene oblika obratka na alatnim strojevima, gdje dolazi do smanjenja volumena obratka zbog djelovanja reznog alata koji je najčešće u obliku klina [8]. Slika 21 prikazuje cijeli sustav potreban za obradu odvajanjem čestica.



Slika 21. Shematski prikaz obrade odvajanjem čestica [8]

Prednosti obrade odvajanjem čestica jesu sljedeće:

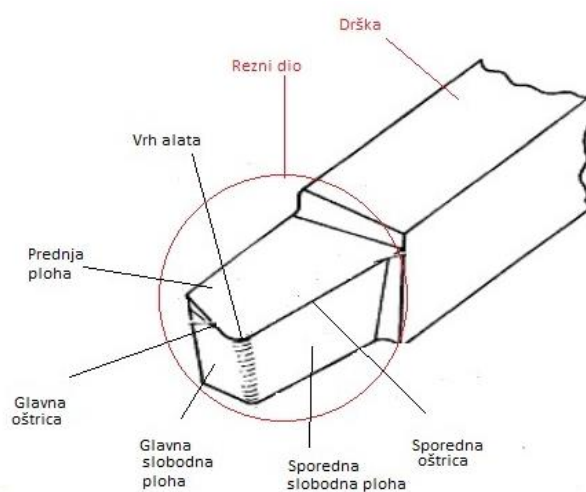
- postizanje točnosti, uskih tolerancija i dobre kvalitete obrađene površine
- najbolji način da se formiraju oštri rubovi, ravne površine, te unutarnji i vanjski profili
- primjena kod gotovo svih poznatih materijala
- obrada najsloženijih oblika površina
- moguće obrade u širokom rasponu dimenzija
- jednostavna automatizacija procesa
- ekonomičnost i produktivnost kod maloserijske i pojedinačne proizvodnje [8]

dok su nedostaci:

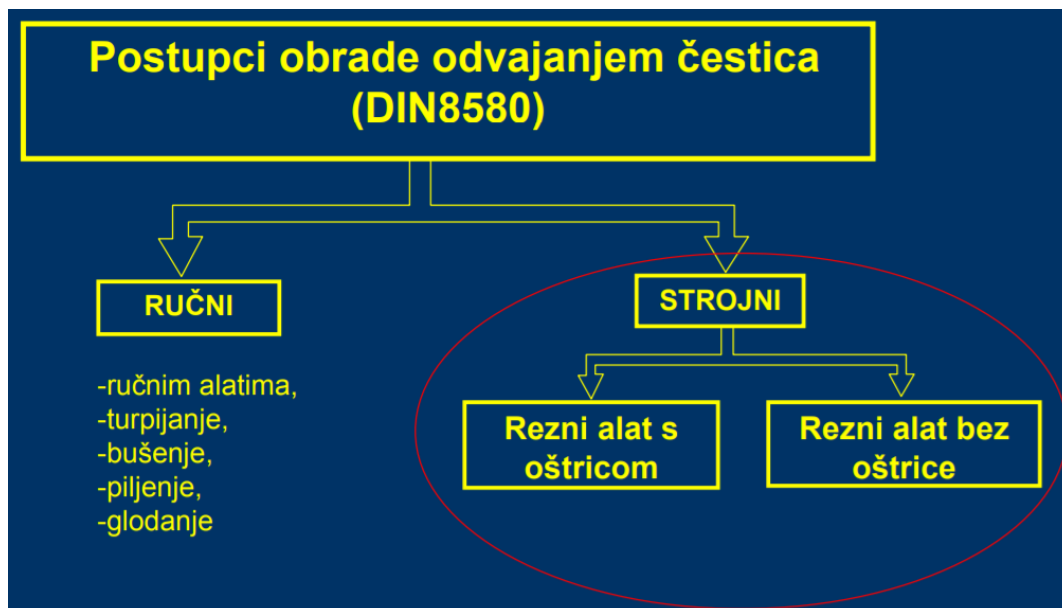
- generiranje odvojene čestice

- ponekad je za formiranje jednog elementa obratka potrebno primijeniti više postupaka obrade i alatnih strojeva
- neki dijelovi zahtijevaju primjenu CNC strojeva i složenog programiranja (CAD/CAM sustavi)
- alatni strojevi zahtijevaju veliki prostor
- mikroklima je pod jakim utjecajem obradnih procesa (toplina, buka, rashladne tekućine...)
- veliki udio pomoćnih i pripremnih vremena (vrijeme zahvata alata i obratka je ponekad manje od 10% ukupnog vremena protoka pozicije) [8].

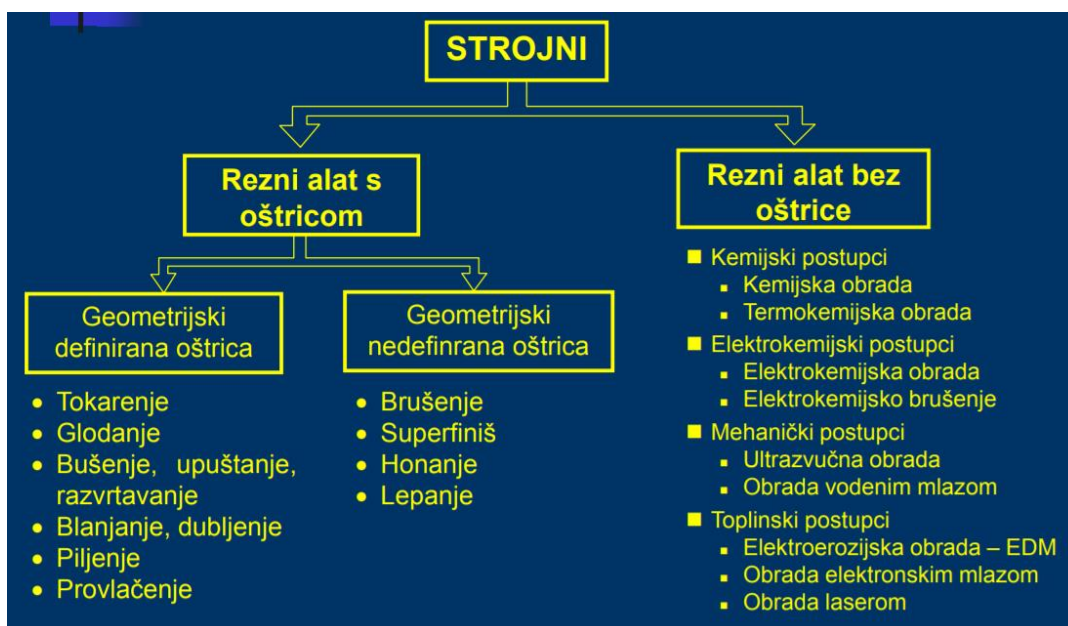
Postupci obrade odvajanjem čestice dijele se na ručne i strojne, slika 23. Strojni postupci ovise o vrsti alata koji može biti s oštricom (slika 22) i bez oštrice. Prikaz podjele strojnih postupaka predložen je slikom 24.



Slika 22. Rezna oštrica s glavnim komponentama



Slika 23. Podjela postupaka obrade odvajanjem čestica [8]



Slika 24. Podjela strojnih postupaka obrade odvajanjem čestica [8]

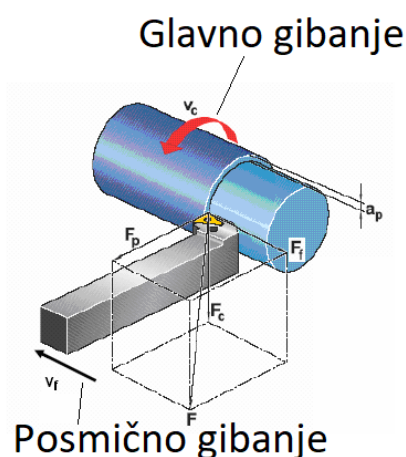
Razlikuju se dvije vrste gibanja kod obrade odvajanjem česticama: glavno i pomoćno kao je detaljizirano slikom 25.



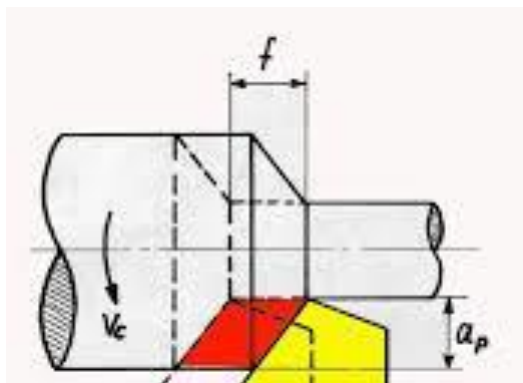
Slika 25. Gibanja kod obrade odvajanjem čestica [8]

5.1.1. Tokarenje

Tokarenje je postupak obrade odvajanjem čestica (rezanjem) pretežno rotacijskih (simetričnih i nesimetričnih, okruglih i neokruglih) površina. Izvodi se na različitim vrstama alatnih strojeva, pretežno na tokarilicama. Glavno gibanje je kružno kontinuirano i najčešće je pridruženo obratku. Parametar pridružen obratku je brzina rezanja v_c , a uz njega i dubina rezanja a_p . Posmično gibanje je pridruženo alatu, a u osnovi je pravolinijsko kontinuirano, u pravcu paralelnom osi rotacije obratka ili u pravcu okomitom na os rotacije [8]. Alatu je pridružen još jedan parametar, a to je posmak f . Alat za tokarenje je tokarski nož definirane geometrije reznog dijela, s jednom glavnom reznom oštricom. Navedena gibanja i parametri obrade prikazani su na slikama 26 i 27.



Slika 26. Gibanja kod tokarenja i parametri obrade [8]

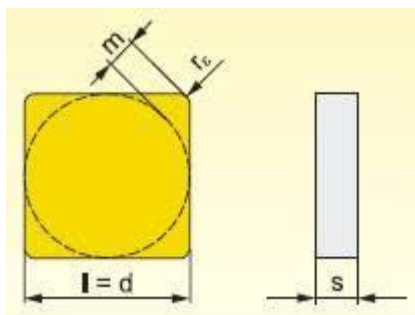


Slika 27. Posmak kod tokarenja [8]

Tokarski nože može biti od brzoreznog čelika, tvrdog metala, cermeta, keramike, kubičnog bor-nitrida ili dijamanta [8].

5.2. Geometrija rezne oštrice

U svrhu ispitivanja korištena je komercijalna pločica oznake SNUN 120408, slika 28. Pločica pripada tvrdim metalima P grupe, koji imaju 43% TiC i TaC. Prikladni su za obradu materijala s dugom strugotinom, gdje su moguće i različite brzine obrade [11].



Slika 28. Geometrija rezne pločice

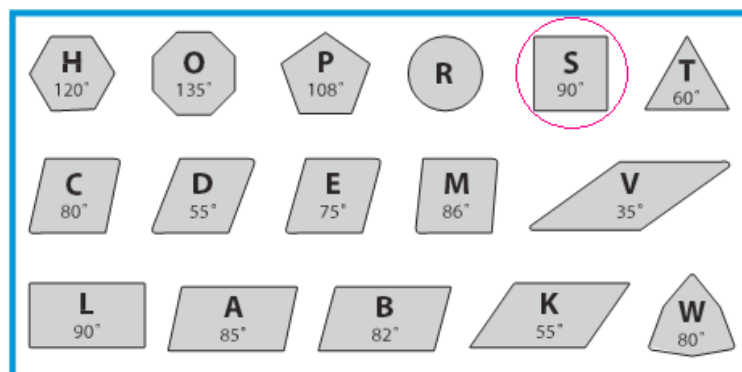
U tablici 3 prikazane su dimenzije korištene SNUN pločice.

Tablica 3. Dimenzije SNUN pločice

Oznaka pločice	l (d) [mm]	m [mm]	s [mm]	r_e [mm]
SNUN 120408	12,70	2,30	4,70	0,8

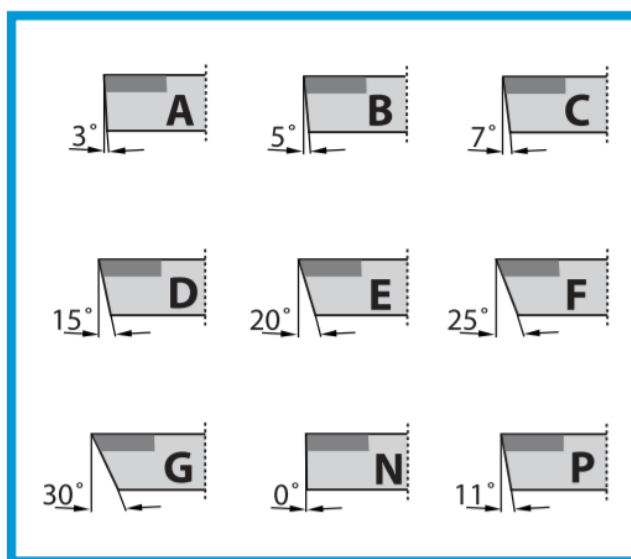
Postupak označavanja pločice je sljedeći:

- a) Prvo slovo u oznaci rezne pločice označava njen oblik i u ovom slučaju to je kvadratna pločica oznake "S", slika 29.



Slika 29. Oblici reznih pločica [10]

- b) Drugo slovo "N" odnosi se na skošenja rezne pločice prikazana slikom 30. Očito je da se radi o reznoj pločici izvedenoj bez skošenja.



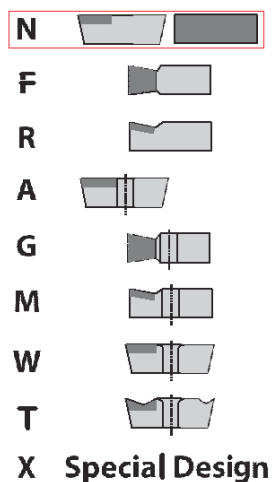
Slika 30. Skošnja reznih pločica [10]

- c) Tolerancijsko polje glavnih dimenzija rezne pločice (slika 28) određuje treći slovni simbol koji upućuje na tolerancijsko polje “U” čija su glavna obilježja predložena tablicom 4.

Tablica 4. Tolerancijska polja reznih pločica [10]

	m	s	d		m	s	d¹
A	± 0.0002	± 0.0010	± 0.0010	J	± 0.0002	± 0.0010	$\pm 0.0020 - 0.0059$
F	± 0.0002	± 0.0010	± 0.0005	K	± 0.0005	± 0.0010	$\pm 0.0020 - 0.0059$
C	± 0.0005	± 0.0010	± 0.0010	L	± 0.0010	± 0.0010	$\pm 0.0020 - 0.0059$
H	± 0.0005	± 0.0010	± 0.0005	M¹⁾	$\pm 0.0031 - 0.0079$	± 0.0051	$\pm 0.0020 - 0.0059$
E	± 0.0002	± 0.0010	± 0.0010	N¹⁾	$\pm 0.0031 - 0.0079$	± 0.0098	$\pm 0.0020 - 0.0059$
G	± 0.0010	± 0.0051	± 0.0010	U¹⁾	$\pm 0.0051 - 0.0150$	± 0.0051	$\pm 0.0031 - 0.0059$

- d) Zadnji slovni simbol “N” odnosi se na tip umetanja rezne pločice u prihvatač, slika 31.



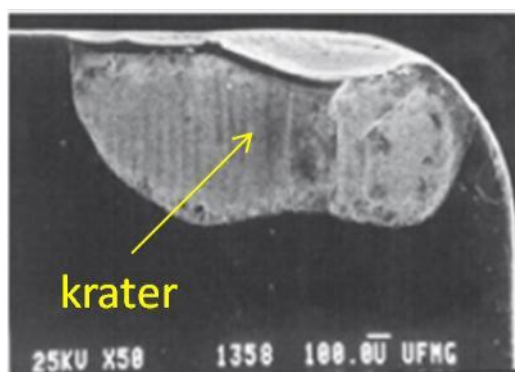
Slika 31. Tipovi umetanja reznih pločica [10]

5.3. Oblici trošenja rezne oštrice alata

Trošenje na prednjoj površini i trošenje na stražnjoj površini alata najčešći su oblici trošenja koji mogu nastati na reznom alatu. Uz njih, još se mogu pojaviti manje učestali procesi kao što su: trošenje stvaranjem naljepka i trošenje vrha alata [3].

5.3.1. Trošenje prednje površine

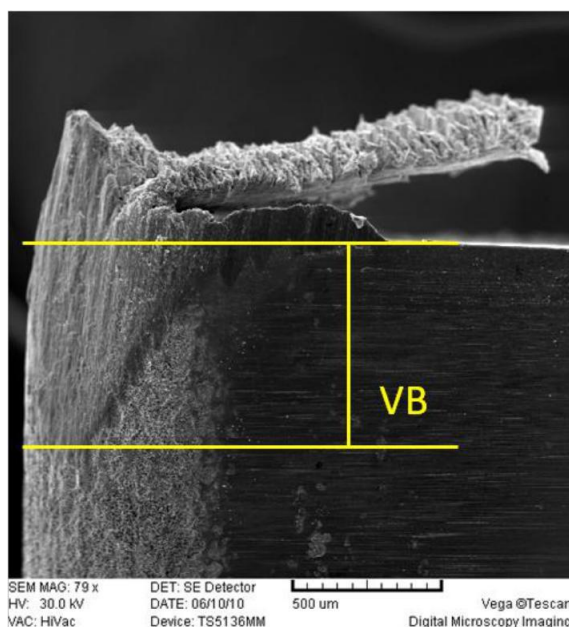
Pojava kratera na prednjoj površini reznog alata („crater wear“) nastaje na mjestu gdje odvojena čestica prelazi preko površine alata uslijed visoke temperature procesa i relativno velike brzine rezanja [3]. Do formiranja kratera dolazi najčešće na udaljenosti od 0,2 – 0,5 mm od ruba oštrice. S vremenom, krater poprima sve veću dubinu što uzrokuje uništenje rezne oštrice. Dakle, glavni parametar koji se mjeri prilikom trošenja prednje površine je dubina kratera KT . Kako bi se spriječilo kratersko trošenje, potrebno je smanjiti brzinu rezanja, posmak, temperaturu te koristiti alat veće otpornosti na trošenje. Primjer nastanka kratera na prednjoj površini rezne oštrice alata prikazan je slikom 32.



Slika 32. Pojava kratera na prednjoj površini rezne pločice [3]

5.3.2. Trošenje stražnje površine

Širina područja trošenja, koja se označava s *VB*, je najčešće promatrani parametar trošenja kada je riječ o stražnjoj površini. Najveća dopuštena vrijednost trošenja stražnje površine alata prije njegove izmjene većinom je kriterij za ocjenu radnog vijeka alata i obuhvaća vrijednosti od 0,2 – 1,6 mm te ovisi o vrsti obrade [3]. Na slici 33 je prikazan izgled istrošene stražnje površine alata. Trošenje stražnje površine nastaje prvobitno uslijed abrazijskog trošenja alata, ali se ne može izostaviti i utjecaj adhezijskog trošenja. Smanjenje brzine rezanja u većini slučajeva može smanjiti trošenje stražnje površine.

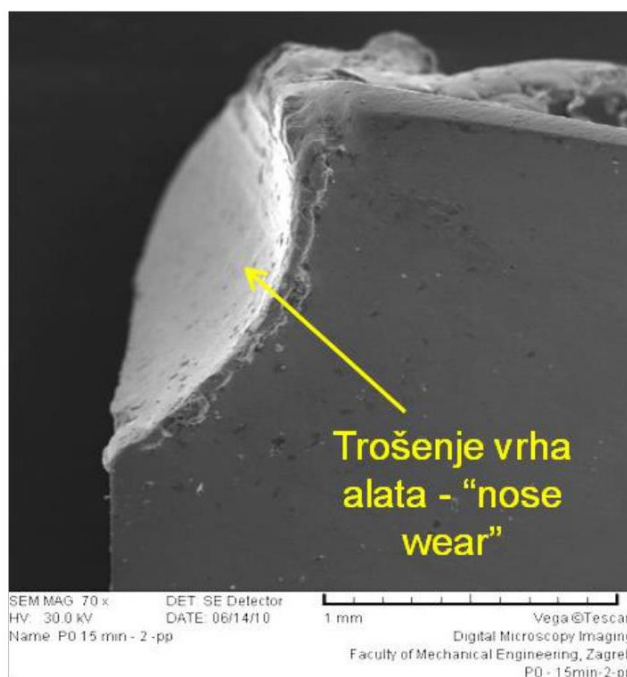


Slika 33. Trošenje stražnje površine alata [3]

5.3.3. Trošenje vrha alata

Uslijed krhke ili preslabe oštrice alata može doći do krzanja oštrice kako je prikazano na slici 34. Takvo oštećenje uzrokuje lošu teksturu obrađene površine i preveliko trošenje stražnje površine. Da bi se to spriječilo oštrica alata mora biti izrađena od čvršćeg i žilavijeg

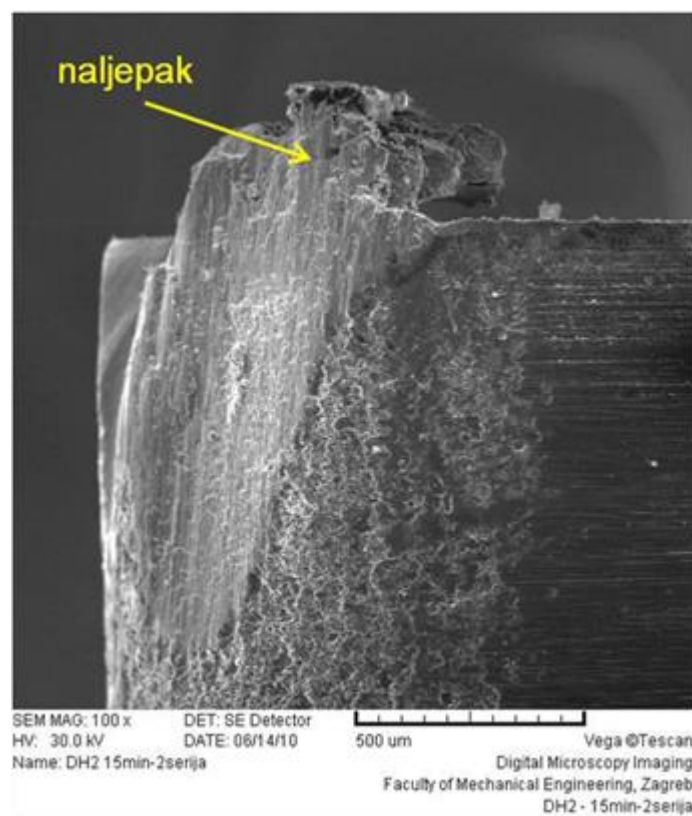
materijala, te je potrebno povećati brzinu rezanja i stabilnost kao i smanjiti posmak na početku reza [4].



Slika 34. Trošenje vrha rezne oštrice [3]

5.3.4. Trošenje stvaranjem naljepka

Kod srednjih brzina rezanja može doći do gomilanja materijala obratka pri vrhu rezne oštrice. Kako se otkidaju slojevi obratka, prvi sloj materijala koji se nalijepi na vrhu alata znatno očvrstne uslijed smičnog naprezanja. Kontinuirano ponavljanje ovog procesa uzrokuje nakupljanje očvrstnutog materijala obratka koji se formira u obliku naljepka, kako je prikazano na slici 35. To je vrlo nestabilna tvorevina koja se lomi i iznova stvara. Štiti oštricu alata od trošenja, ali ulaskom komadića naljepka u sustav, može djelovati abrazivno na alat [3].



Slika 35. Naljepak na oštrici alata [3]

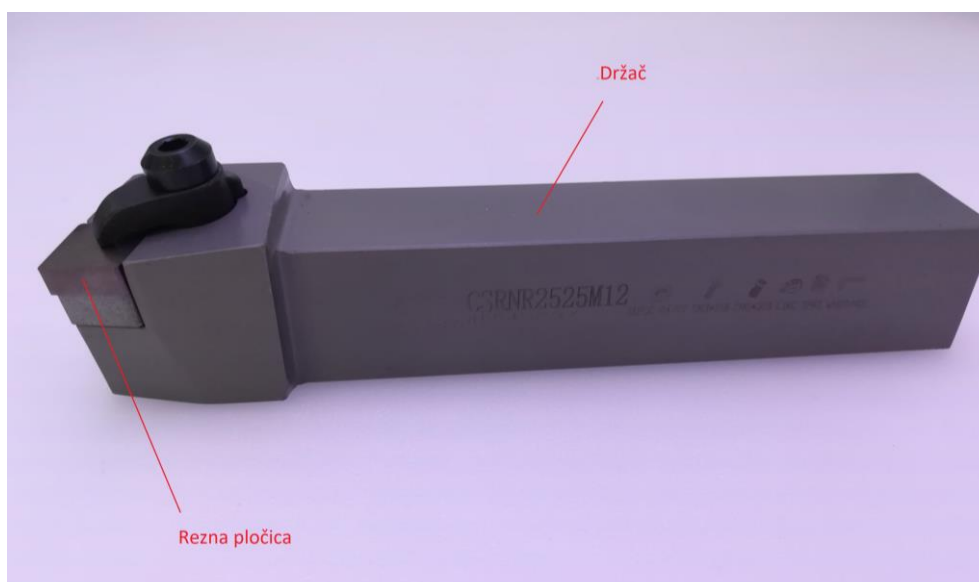
6. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu radu provedena su ispitivanja trošenja jednoreznim alatom što zapravo predstavlja obradu odvajanjem čestica odnosno tokarenje. Rezni alat je komercijalna pločica od tvrdog metala P- tipa oznake SNUN 120408, slika 36.



Slika 36. Rezna pločica SNUN 120408

Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za alatne strojeve na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Za početak, rezna pločica SNUN 120408 se fiksira u držač alata (slika 37) te se cijeli držač učvršćuje u tokarski obradni centar.



Slika 37. Rezna pločica stegnuta u držač

Ispitivanje je provedeno na tokarskom obradnom centru vrste SBL 500 (slika 38), a odabrani parametri obrade prikazani su tablicom 5.



Slika 38. Tokarski obradni centar SBL 500

Tablica 5. Parametri obrade

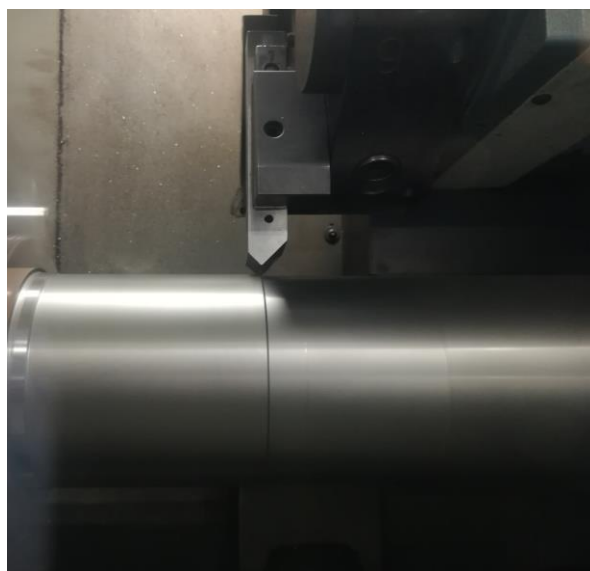
Parametri obrade SL 250	Brzina rezanja v_c , [m/min]	Dubina rezanja a_p , [mm]	Posmak f , [mm]
	200	1	0,2

Za materijal obratka odabran je sivi lijev oznake EN-GJL-250. Brojčani iznos predstavlja vlačnu čvrstoću koja za ovaj lijev iznosi 250 - 290 N/mm² [9]. Kemijski sastav sivog lijeva nije propisan normama i uobičajeno iznosi: 2,5 – 4,5% C, 0,3 – 1,2% Mn, 1 – 4% Si, 0,4 – 1,5% P, <0,1% S.

Obradak od sivog lijeva se steže u steznu glavu (amerikaner) i s druge strane podupire konjičem s pomičnim šiljkom (slika 39) te se unose parametri obrade koji su odabrani prema geometriji rezne pločice. Nakon završene pripreme, započinje postupak tokarenja u trajanju od 15 minuta, slika 40.



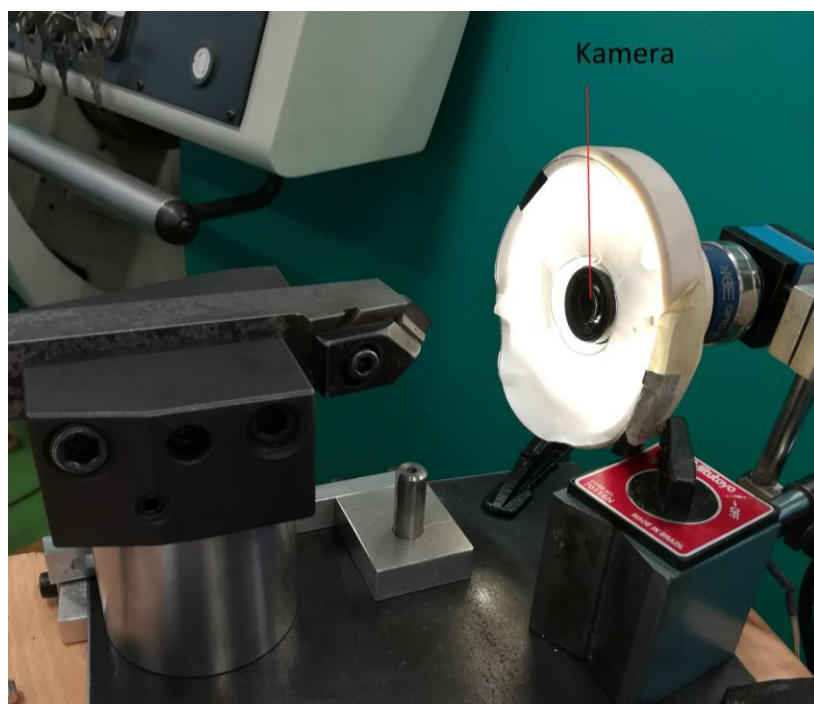
Slika 39. Obradak stegnut u stroj



Slika 40. Detalj zahvata

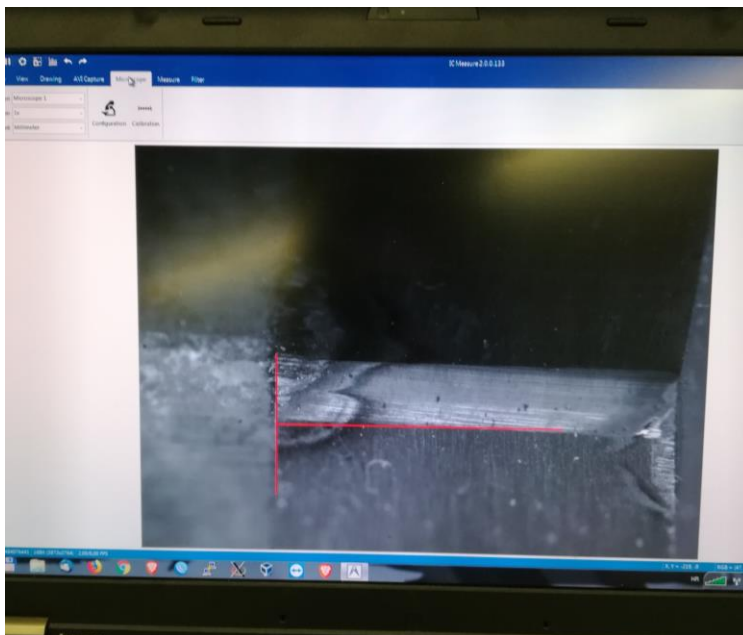
6.1. Snimanje trošenja stražnje površine

Nakon namještanja obratka u tokarilicu i i pričvršćenja rezne pločice u držač alata slijedi obrada tokarenjem u trajanju 10 minuta plus dodatnih 5 minuta nakon čega se obrada prekida, uzima se rezna pločica i stavlja u prihvat za snimanje opremljen kamerom, slika 41.



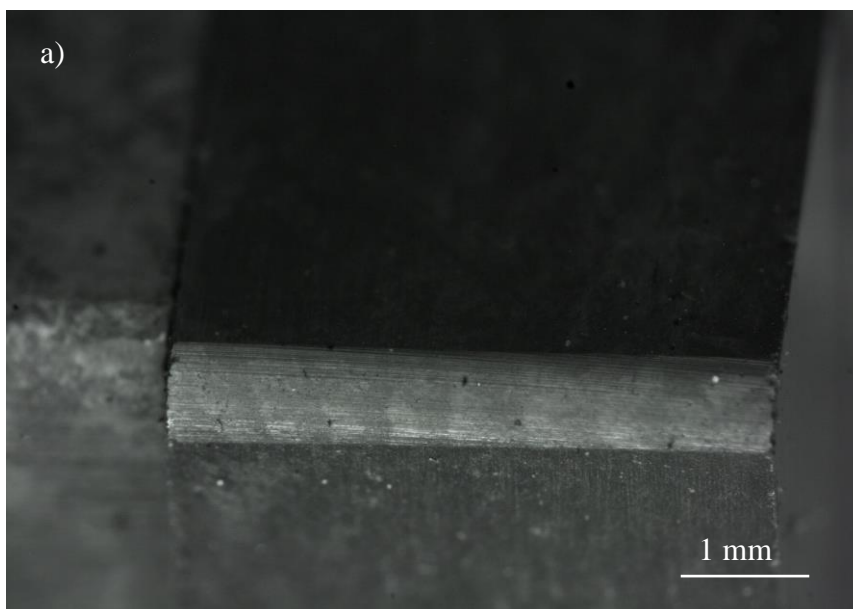
Slika 41. Snimanje rezne oštrice

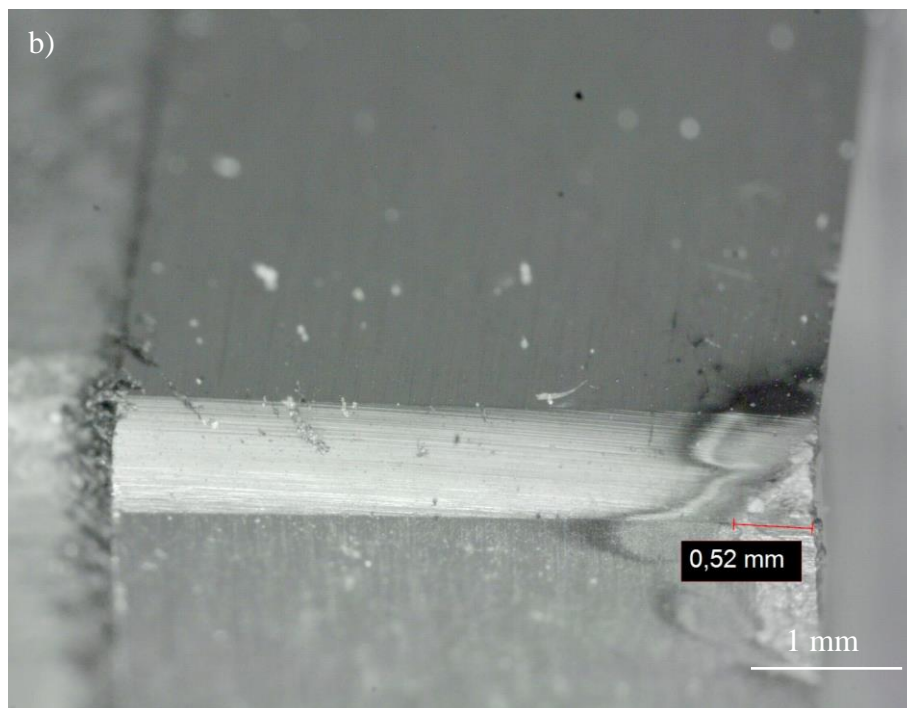
Prvo se snima stražnja površine rezne pločice te zatim i prednja površina. Dobivene slike prenose se na računalo i obrađuju u programskom paketu *IC Measure*. To je program s pomoću kojeg se obrađuje digitalna slika i provode mjerenja, u ovom slučaju istrošenosti rezne površine i oštrice alata.



Slika 42. Projicirana slika trošenja

Ispitivanje počinje snimanjem nekorištene rezne pločice, slika 43a). Zatim se ona podvrgava rezanju te se obrada zaustavlja nakon 10 i 15 minuta. Nakon svakog zaustavljanja obrade, snima se stražnja površina i mjeri širina trošenja, VB . Slike 43b) i c) prikazuju trošenje stražnje površine nakon 10 i 15 minuta te iznose parametra VB .



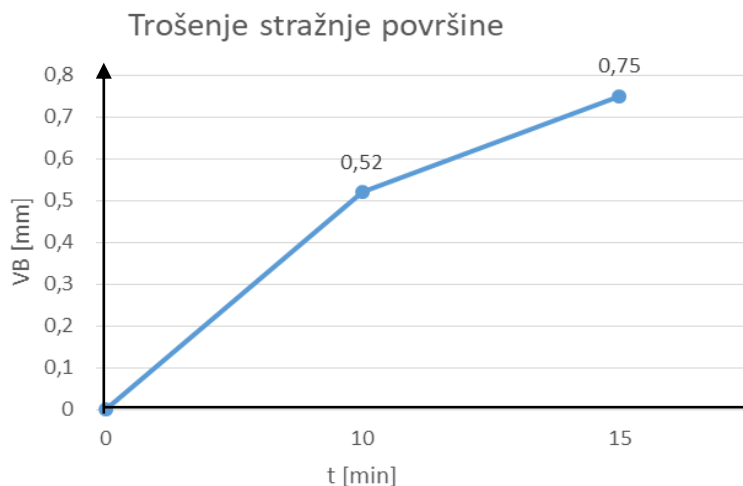


Slika 43. Trošenje stražnje površine rezne pločice:

- a) Površina prije obrade
- b) Nakon 10 minuta obrade
- c) Nakon 15 minuta obrade

Na stražnjoj površini rezne pločice došlo je do abrazijskog trošenja. Vrijednost širine trošenja VB nakon 10 minuta iznosi 0,52 mm, a nakon 15 minuta ona naraste na 0,75 mm.

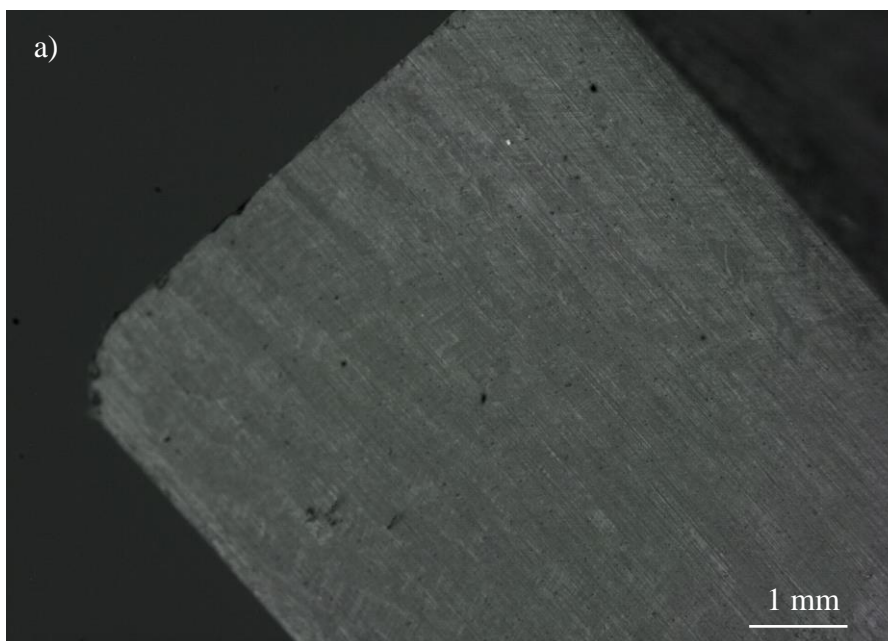
Nakon mjerenja širine trošenja stražnje površine, u računalnom programu *Excell* grafički se konstruira krivulja ovisnosti parametra VB o vremenu, slika 44.

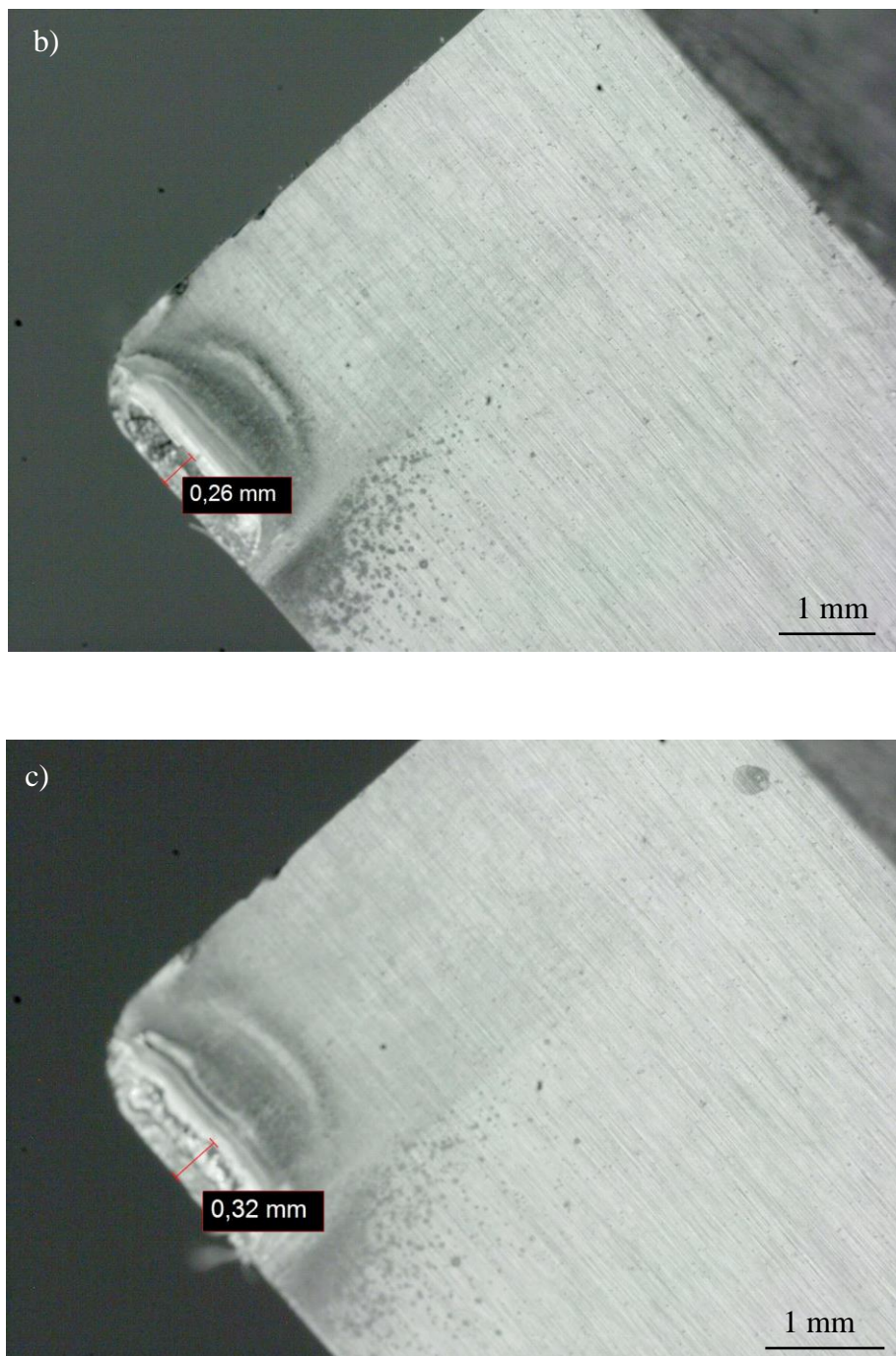


Slika 44. Grafička ovisnost parametra VB o vremenu

6.2. Snimanje trošenja prednje površine

Postupak ispitivanja odvija se kao i kod ispitivanja stražnje površine samo što se ovdje promatra prednja površina i mjeri se parametar KT , odnosno dubina nastalog kratera. Slika 45 prikazuje trošenje prednje površine uz mjerenje kratera nakon 10 i 15 minuta.

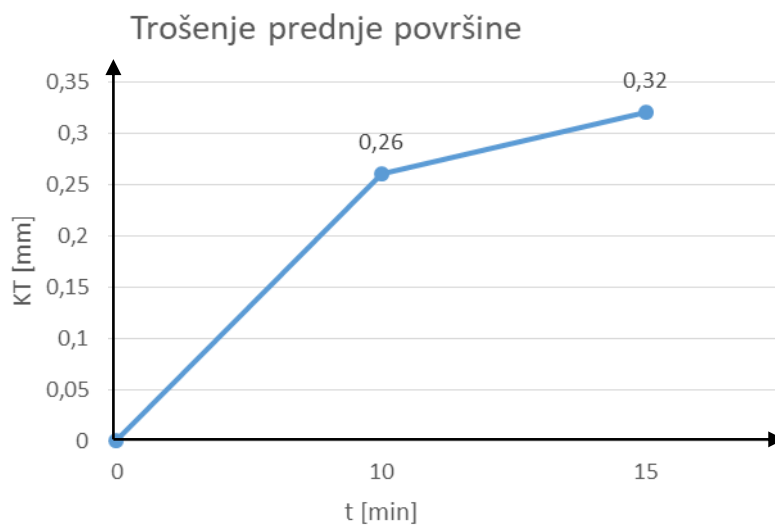




Slika 45. Trošenje prednje površine rezne pločice:

- a) Površina prije obrade
- b) Površina nakon 10 minuta
- c) Površina nakon 15 minuta

Korelacija trošenja prednje površine u ovisnosti o vremenu prikazana je slikom 46.



Slika 46. Grafička ovisnost dubine kratera o vremenu

Nakon 10 minuta obrade tokarenjem duljina oštećenja iznosi 0,26 mm, a nakon 15 minuta 0,32 mm. U odnosu na stražnju površinu, trošenje prednje površine napreduje sporije u vremenskom intervalu između 10. i 15. minute.

7. ANALIZA REZULTATA MJERENJA I ZAKLJUČAK

Svrha cjelokupnog ispitivanja bilo je razmatranje dominantnih mehanizama trošenja do kojih dolazi na reznjoj pločici od tvrdog metala kada je ona izložena približno realnim radnim uvjetima. Najčešće je trošenje prednje i stražnje površine rezne oštrice, gdje se na prednoj površini javlja krater dok je na stražnjoj površini prisutno abrazivno trošenje.

Iz navedenih rezultata mjerenja vidljivo je da je razlika duljine oštećenja na prednjoj površini između 10. i 15. minute manja nego razlika duljine oštećenja na stražnjoj površini u jednakom vremenskom intervalu. Proizlazi da trošenje na stražnjoj površini napreduje znatno brže od trošenja na prednjoj površini pa se stoga širina trošenja na stražnjoj površini, *VB*, uzima kao glavni kriterij trošenja rezne oštrice.

Ovo ispitivanje je od iznimne važnosti za primjenu reznih alata u svakodnevnoj eksploataciji jer se razmatranjem njihovih svojstava, poput tvdoće i žilavosti te detektiranjem karakterističnih mehanizama trošenja, može predvidjeti njihovo djelovanje u eksploataciji, a samim time i produžiti radni vijek alata.

LITERATURA

- [1] T. Aleksandrov Fabijanić: Razvoj referentnih pločica tvrdoće po Vickersu postupkom metalurgije praha, Doktorski rad, Zagreb, 2014.
- [2] K. Delić: Tribološka svojstva prevučenih i neprevučenih tvrdih metala, Diplomski rad, Zagreb, 2016.
- [3] S. Šolić: Utjecaj mikrostrukture brzoreznog čelika na tribološka svojstva reznih alata, Doktorski rad, Zagreb, 2010.
- [4] M. Peček: Utjecaj geometrije svrdla i parametara obrade na trošenje oštrice pri bušenju kamena, Diplomski rad, Zagreb, 2015.
- [5] D. Ćorić: Posebni metalni materijali – III Dio, Zagreb, 2017.
- [6] https://bib.irb.hr/datoteka/651766.Zvonimir_Dadic_Triboloski_principi.pdf (preuzeto 15.02.2019.)
- [7] https://eucenje.fsb.hr/pluginfile.php/44540/mod_resource/content/1/predavanja/mehanizmi_2012.pdf (preuzeto 15.02.2019.)
- [8] Š. Šavar: Obrada odvajanjem čestica, Zagreb, 1991.
- [9] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof, Svojstva i primjena materijala, Zagreb, 2011.
- [10] <http://www.tysontool.com/BECKER-E-Cat-tech.pdf> (preuzeto 15.02.2019.)
- [11] Z. Ćakić: Alati za glodanje, Diplomski rad, Karlovac, 2016.

PRILOZI

I. CD-R disc